

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.041

驱动器饱和和下多自由度机械臂同步控制方法

曹雪红, 曹盛力

(西安邮电大学 自动化学院, 陕西 西安 710121)

摘要:为解决驱动器饱和引起的多自由度机械臂控制不同步问题并提高控制精度和收敛速度,提出驱动器饱和和下多自由度机械臂同步控制方法。通过从正向和逆向两方面建立多自由度机械臂运动学方程,并将其与驱动器中的数据匹配,在 CAN 总线监测设备获取机械臂的需求指令后,确定每个机械臂驱动器的实际饱和状态与控制指令的匹配程度。构建固定时间滑模控制器,添加可消除驱动器饱和状态和实际控制指令误差的功能,完成对多自由度机械臂的精准同步控制。实验结果表明:该方法可取得较高的控制精度和较快的收敛速度,能控制每个机械臂按照期望的同步轨迹运行。

关键词:驱动器饱和;CAN 总线数据融合;同步控制;多自由度机械臂

中图分类号:TP241 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)03-0211-05

Synchronous Control Method for Multi Degree of Freedom Robotic Arm under Actuator Saturation

CAO Xuehong, CAO Shengli

(School of Automation, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: In order to solve the problem of asynchronous control of multi degree of freedom robotic arms caused by driver saturation and improve control accuracy and convergence speed, a synchronization control method for multi degree of freedom robotic arms under driver saturation is proposed. By establishing the kinematic equations of a multi degree of freedom robotic arm from both forward and reverse perspectives, and matching them with the data in the driver, the actual saturation state of each robotic arm driver and the degree of matching with the control instructions are determined after obtaining the demand instructions of the robotic arm through the CAN bus monitoring device. A fixed time sliding mode controller is built, functions to eliminate driver saturation state and actual control instruction errors are added, and precise synchronization control of multi degree of freedom robotic arms is achieved. The experimental test results show that the proposed method can achieve high control accuracy and fast convergence speed, and can control the operation by each robotic arm along the expected synchronous trajectory.

Keywords: driver saturation; CAN bus data fusion; synchronous control; multi degree of freedom robotic arms

0 引言

多自由度机械臂是一个复杂的系统,具有极强的非线性和耦合性。它受外界力的扰动以及内部摩擦等诸多因素影响,增加了多自由度机械臂同步控制难度。因此,开展多自由度机械臂的同步控制具有重要意义。

ZHANG 等^[1]引入了虚拟主轴来改善同步误差引起的累积误差效应,并结合分数阶微积分理论和滑模控制理论,研究和分析了分数阶滑模控制方法。陈杰等^[2]提出一种新型非奇异固定时间滑模控制策略。基于固定时间稳定理论构造新型固定时间滑模面,引入多自由度机械臂运动学方

程,得到非奇异固定时间滑模控制器。刘世杰等^[3]提出含边界层的分数阶滑模控制,通过饱和函数抑制抖振并调节微分阶次,仿真验证其较传统滑模控制显著提升两自由度机械臂的收敛性与轨迹跟踪精度。赵寒冰等^[4]提出一种基于法向同步误差补偿的多轴同步控制策略,将跟踪误差分解为法向同步误差和切向延时误差,并设计法向同步误差补偿算法。但由于模型的参数或动力学特性估计不准确,导致补偿算法的设计出现偏差。马世辉^[5]提出一种基于偏差耦合的同步控制策略,根据机械臂的动力学模型设计偏差耦合同步控制算法的控制模型,但因参数选择不当导致同步误差增大。

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目(2023-JC-QN-0002)

第一作者简介:曹雪红(1981—),女,陕西西安人,工程师,硕士,研究方向为检测技术与自动化装置、控制科学与工程, xuptexh@126.com。

此外,针对机械臂控制的非线性、耦合性及环境干扰等问题,研究者提出了多种创新方法。例如,李美强等^[6]通过三次样条插值算法优化关节抖动问题,显著降低了关节轨迹曲率,提高了机械臂运行的稳定性;李元春等^[7]结合自适应神经网络与滑模控制,提升了系统的鲁棒性,使机械臂在复杂环境下仍能保持良好的性能;周旗龙等^[8]基于深度强化学习(TD3-HER)实现了水下机械臂的高精度抓取控制,在仿真环境中验证了其优越性;成国振等^[9]提出的自适应分数阶滑模控制方法进一步优化了轨迹跟踪性能,使得机械臂能够更精确地跟随预定轨迹;庄虎跃等^[10]设计的基于视觉的机械臂目标自动跟随系统,展示了机械臂在动态环境中的应用潜力;章东旭等^[11]将分数阶滑模控制与自抗扰技术相结合,显著提高了6自由度机械臂的响应速度和抗干扰能力。此外,黄自鑫等^[12]提出欠驱动三连杆机械臂末端轨迹规划策略,通过逆向差分法解算关节角度偏差,结合双向轨迹算法优化运动精度。徐学义^[13]基于BP神经网络优化虚拟参考反馈控制器输入输出匹配;宁海成^[14]构建非线性微积分控制模型实现亚毫米级定位;梁艳芳等^[15]通过双滑模面分域控制提升响应速度。

尽管已有研究在轨迹跟踪、同步控制和路径规划方面取得了进展,但机械臂在复杂环境下的高精度同步控制仍然面临挑战,例如模型不确定

性、外部干扰抑制以及驱动器饱和和限制等问题。为此,本文提出一种驱动器饱和下多自由度机械臂同步控制方法,旨在通过优化控制策略实现高精度、稳定的同步性能。

1 多自由度机械臂运动学分析

1.1 多自由度机械臂驱动器运行速度信息提取

坐标系模型可以提供机械臂的几何结构和关节之间的运动关系,确定各个关节的位姿,从而为计算驱动器运行速度和加速度信息提供基础^[16]。假设 θ 为坐标系 x 轴与机械臂之间的夹角,即关节角, L 为机械臂长度。3自由度机械臂D-H(Denavit-Hartenberg)参数^[17]如表1所示。

表1 多自由度机械臂D-H参数

参数	关节			
	0	1	2	3
机械臂扭转角/(°)	0	0	0	0
机械臂长度/m	L_0	L_1	L_2	L_3
机械臂偏距/m	0	0	0	0
关节角/(°)	90	θ_1	θ_2	θ_3
关节变量	—	θ_1	θ_2	θ_3

根据坐标系模型和D-H参数,推导每个关节位置、速度以及加速度与关节角度的函数关系,如式(1)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} {}^0A_1 &= \sum_{q'} a(O_0, 90^\circ) T_{\text{rans}}(x_0, L_0) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & L_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^1A_2 &= \sum_{q'} a(O_1, \theta_1) T_{\text{rans}}(x_1, L_1) = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & L_1 \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & L_1 \sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: A 为上一个坐标系和下一个坐标系的关节位置参数; q' 为速度参数; a 为加速度参数; T_{rans} 为关节角度参数。驱动器运动方程是关节位置 q 和速度 q' 的函数,反映关节速度与驱动器速度之间

的关系。结合3自由度机械臂的3个姿态变量 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 和3个位置变量 L_1 、 L_2 、 L_3 ,得到机械臂驱动器的运动方程:

$$P(q, q') = \begin{bmatrix} -L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) - L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) - L_1 \sin\theta_1 \\ L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_1 \cos\theta_1 + L_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

计算末端驱动器的每个机械臂的运行速度信息:

$$v=P(q,q')\times dq \quad (3)$$

计算末端驱动器包含的每个机械臂的运行加速度信息:

$$a=P(q,q')\times dq+Q(q,q')\times dq \quad (4)$$

式中 $Q(q,q')$ 为另一个关节位置和速度的函数。反映了关节加速度与驱动器速度和加速度之间的关系。

1.2 多自由度机械臂驱动器饱和度判断

通过判断驱动器是否饱和,确保机械臂的关节运动速度在驱动器允许的范围内,避免驱动器过载或无法满足要求的情况,从而提高机械臂的运动控制精度、稳定性和可靠性^[18-19]。将驱动器的运行速度 v 与机械臂关节角速度 $\dot{q}$ 之间的关系通过雅可比矩阵 J 表示:

$$J=\frac{\zeta v}{\zeta \dot{q}}=\begin{bmatrix} \frac{\zeta v_1}{\zeta \theta_1} & \cdots & \frac{\zeta v_1}{\zeta \theta_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\zeta p_m}{\zeta \theta_1} & \cdots & \frac{\zeta p_m}{\zeta \theta_n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: m 为 p 元素向量的个数; ζ 为矩阵系数; θ_n 表示 n 个位置变量。

对雅可比矩阵进行进一步处理,使其与驱动器中的数据匹配在一起,则有

$$J=\begin{bmatrix} -L_3 C_{123} - L_2 C_{12} - L_1 C_1 - L_3 C_{123} - L_2 C_{12} - L_3 C_{123} \\ -L_3 S_{123} - L_2 S_{12} - L_1 S_1 - L_3 S_{123} - L_2 S_{12} - L_3 S_{123} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $C_i = \cos \theta_i$; $S_i = \sin \theta_i$ 。

将处理后的雅可比矩阵与驱动器中的数据进行对比和分析,以确定驱动器的饱和程度。如果雅可比矩阵乘以关节角速度的结果超过了驱动器的限制范围,则可以判断驱动器已经饱和。假设驱动器的最大速度限制为 $V_{\max}$,则可以使用下式来描述:

$$\|J \times \dot{q}\| \geq V_{\max} \quad (7)$$

式中 $\|J \times \dot{q}\|$ 为雅可比矩阵 J 乘以关节角速度 $\dot{q}$ 的结果的模。如果这个模大于驱动器的最大速度限制,则可以判断驱动器已经饱和。

2 多自由度机械臂同步控制实现

2.1 固定时间滑模面

针对多自由度机械臂驱动器在工作过程中受到各种因素的影响导致——驱动器处于饱和状态,根据驱动器饱和度与命令匹配的结果构建固

定时间终端滑模面:

$$K=\bar{E}+\lambda_1 \operatorname{sign}^{\gamma_1} E+\lambda_2 \operatorname{sign}^{\gamma_2} E=A(u_r-q) \quad (8)$$

式中: $K=[k_1^T, k_2^T, \cdots, k_n^T]$; $\lambda_1 > 0$ 、 $\lambda_2 > 0$ 、 $\gamma_1 > 1$ 、 $0 < \gamma_2 < 1$ 均为正向、逆向运行的滑模面参数; $\operatorname{sign}^{\gamma_n} E=[|E_1|^{\gamma_1} \operatorname{sgn}(E_1) \cdots |E_n|^{\gamma_n} \operatorname{sgn}(E_n)]$ 为交叉误差; $\bar{E}$ 为耦合误差; A 为机械臂斜对称矩阵; u_r 为辅助矩阵,表达式为

$$u_r=\dot{q}+A^{-1} \lambda_1 \operatorname{sign}^{\gamma_1} E+A^{-1} \lambda_2 \operatorname{sign}^{\gamma_2} E \quad (9)$$

对 K 进行求导得到:

$$\dot{K}=\bar{E}+\gamma_1 \lambda_1 E^{\gamma_1-1}+\gamma_2 \lambda_2 E^{\gamma_2-1}=A(\dot{u}_r-\ddot{q}) \quad (10)$$

由上可知 $\gamma_2-1 < 0$, 当 $E=0$ 时,滑模面陷入到奇异值问题中。为了防止该问题出现,考虑驱动器饱和度与控制指令的匹配结果,对 u_r 作出调整:

$$u_r=\dot{q}+A^{-1} \lambda_1 \operatorname{sign}^{\gamma_1} E+A^{-1} \lambda_2 \varphi(E) \quad (11)$$

通过调整滑模面的设计参数,如正定矩阵 $\varphi(E)$ 和辅助矩阵 u_r ,以确保机械臂驱动器的工作状态与控制指令的要求相匹配。 $\varphi(E)$ 表达式为

$$\varphi(E)=\begin{cases} \operatorname{sign}^{\gamma_2} E & K=0 \text{ 或 } K \neq 0, |E| > E_K \\ l_1 u_r + l_2 u_r^2 & K \neq 0, |E| \leq E_K \end{cases} \quad (12)$$

式中: E_K 为一个非常小的正数; $l_1=(2-\gamma_2)E_K^{\gamma_2-1}$ 、 $l_2=(\gamma_2-1)E_K^{2-\gamma_2}$ 为辅助矩阵系数。

固定时间滑模面的最终表达式为

$$K=\bar{E}+\lambda_1 \operatorname{sign}^{\gamma_1} E+\lambda_2 \varphi(E) \quad (13)$$

通过这样的设计,可以有效避免驱动器饱和和问题对机械臂运动控制的影响,从而保证控制指令执行的稳定性和准确性。

2.2 控制器设计

由于多自由度机械臂是一个非线性系统,表达式为

$$Z=p\ddot{u}_r+C(q,\ddot{q})u_r+G(q) \quad (14)$$

式中: $C(q,\ddot{q})$ 为离心力和哥氏力矩阵; $G(q)$ 为重力项矩阵。

在控制器设计中,固定时间滑模面被用作已知前提条件,根据这个已知条件推导出了控制器的表达式为

$$\tau=p+B_1 K^{p_1}+B_2 K^{p_2} \quad (15)$$

式中: B_1 、 $B_2 > 0$ 为正定对角矩阵; K^{p_1} 、 K^{p_2} 为在 ρ_1 、 ρ_2 参数下的终端滑模面; $\rho_1 > 1$ 、 $0 < \rho_2 < 1$ 为控制器中的参数。

在控制器设计中,利用了之前得到的固定时间

滑模面的信息。在固定时间滑模控制器中,通过引入控制器的参数和控制器中的鲁棒项 u_0 ,进一步优化控制器。最终滑模控制器的表达式如下:

$$\tau = \dot{p} + B_1 A^T K^{p1} + B_2 A^T K^{p2} + u_0 = W^T \varphi(E) + B_1 A^T K^{p1} + B_2 A^T K^{p2} + u_0 \quad (16)$$

式中: W^T 为同步控制权重; u_0 为控制器中用于消除位置跟踪误差 e 和位置同步误差 ε 的鲁棒项,表达式为

$$u_0 = \begin{cases} (\eta + \eta_1) \frac{K}{\|K\|} & K \neq 0 \\ 0 & K = 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中 η, η_1 为正实数。

综上所述,通过根据驱动器饱和度与控制指令的匹配程度构建固定时间滑模控制器,并添加可消除驱动器饱和状态和实际控制指令误差的功能,可以实现对多自由度机械臂的精准同步控制。这样的控制机制能够保证机械臂运动的稳定性、可控性和控制精度,从而提高机械臂系统的性能和可靠性。

3 实验测试

选择一款精度和稳定性较高的 3 自由度机械臂作为实验对象,各个关节的最大旋转角度为 300° ,机械臂总长为 730 mm,单个机械臂的质量 ≤ 6 kg,末端执行器额定负重为 3 kg。设定驱动器饱和度为 0~100%。设定控制指令数量为 100~800。在图 1 所示的实验场景中,安装了多个传感器来获取机械臂的状态信息,包括关节角度、关节速度以及末端执行器位置。配备专业的控制器,使用 CAN 总线监测设备获取机械臂的运动状态和运动指令。检查和调整了各个机械臂的机械结构,确保其运动范围和负载能力符合实验要求。



图 1 6 自由度机械臂同步控制实验场景

设置不同的控制指令数量,并记录每个指令数量下的驱动器饱和度,结果如图 2 所示。

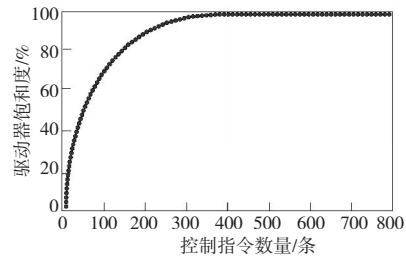


图 2 驱动器饱和度随控制指令数量增加的变化趋势

由图 2 可知,随着控制指令数量的增加,驱动器饱和度逐渐增加而趋近于饱和。随着控制指令数量的增加,机械臂执行的运动更加复杂和多样化,导致驱动器需要更大的输出能力来满足运动需求,使驱动器饱和度逐渐增加。机械臂系统的惯性也在增加,当驱动器输出达到一定水平时,惯性作用会导致机械臂的实际运动速度和位置与控制指令稍有偏差。

设置驱动器饱和度水平分别为 30% 和 50%,记录机械臂的位置同步误差,分析不同驱动器饱和度和下的变化趋势。实验结果如图 3 所示。

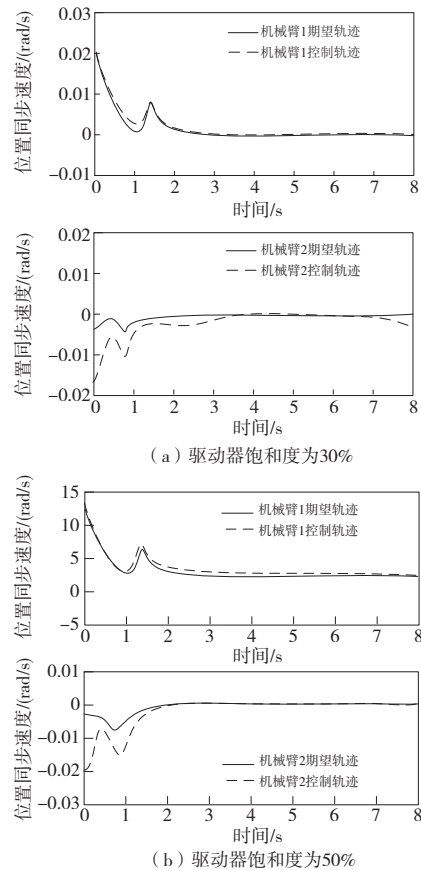


图 3 所提方法位置同步误差控制效果

由图 3 可知,多自由度机械臂经过所提方法进行控制后,各个机械臂的位置跟踪误差收敛精

度均为 10^{-3} rad,并保持在 1.8 s 以内的收敛时间;机械臂系统的位置同步误差同样在 1.8 s 以内收敛。说明所提方法在控制不同驱动器的饱和度水平时,能够实现多自由度机械臂的同步控制,同时

保持较高的收敛精度和较快的收敛速度。

为了验证所提方法与其他两种对比方法在特定驱动器饱和度下的轨迹跟踪控制效果,具体多自由度机械臂期望轨迹实验结果如图 4 所示。

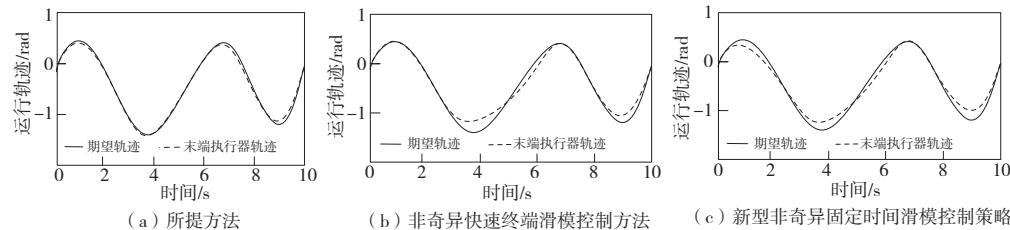


图 4 3 种方法末端执行器轨迹跟踪控制效果对比

由图 4 可知,所提方法在特定驱动器饱和度和状态下表现出较高的稳定性和精度,末端执行器运动轨迹与期望轨迹非常接近,几乎重叠;相对于另外两种控制方法,其具有明显的优势。

4 结语

为了实现在驱动器饱和情况下的多自由度机械臂系统同步控制,本文提出了一种驱动器饱和下的控制方法。通过测试验证了所提方法的有效性。经过所提方法控制后,每个机械臂的运行轨迹与期望轨迹高度重合,同时实现了较快的收敛速度和较高的收敛精度。这是由于所提方法通过确定机械臂驱动器的实际饱和状态与控制指令的匹配程度,设计固定时间滑模控制器,在保证稳定性的同时实现了多自由度机械臂的同步控制。

参考文献:

- [1] ZHANG X, ZHANG J, LU W R, et al. Research on fractional sliding mode synchronous control of robotic ARMS under uncertain disturbance [J]. Automatic Control and Computer Sciences, 2021, 55(1): 26-37.
- [2] 陈杰,刘宜成,涂海燕. 基于凯恩方程的机械臂固定时间滑模控制[J]. 电光与控制, 2021, 28(11): 45-49.
- [3] 赵寒冰,罗欣,钟启明,等. 基于法向同步误差补偿的机械臂多轴同步控制[J]. 微电机, 2023, 56(2): 61-65.
- [3] 刘世杰,黄志来,杨明星,等. 含边界层的机械臂分数阶滑模控制[J]. 上海工程技术大学学报, 2021, 35(4): 327-332.
- [4] 赵寒冰,罗欣,钟启明,等. 基于法向同步误差补偿的机械臂多轴同步控制[J]. 微电机, 2023, 56(2): 61-65.
- [5] 马世辉. 基于偏差耦合的机械臂同步控制策略[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(8): 105-106, 153.
- [6] 李美强,马庆禄,闫浩,等. 多自由度机械臂关节运动控制研究[J]. 机械强度, 2025, 47(2): 147-158.
- [7] 李元春,宋扬,赵博. 环境约束可重构机械臂模块化

力/位置控制[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(6): 709-714.

- [8] 周旗龙,陈伟,宋广武,等. 基于深度强化学习算法的水下机械臂抓取控制研究[J]. 自动化与仪表, 2025, 40(5): 62-65, 70.
- [9] 成国振,陆春月,谭明. 基于自适应分数阶滑模的机械臂轨迹跟踪控制[J]. 机械设计与制造工程, 2024, 53(9): 62-66.
- [10] 庄虎跃,方旭,张钰晗,等. 基于视觉的多自由度机械臂目标自动跟随系统[J]. 江苏工程职业技术学院学报, 2024, 24(1): 15-19.
- [11] 章东旭,李伟,孔科研,等. 基于分数阶滑模自抗扰控制的六自由度串联机械臂研究[J]. 动力学与控制学报, 2025, 23(1): 49-58.
- [12] 黄自鑫,赖旭芝,王亚午,等. 基于轨迹规划的平面三连杆欠驱动机械臂位置控制[J]. 控制与决策, 2020, 35(2): 382-388.
- [13] 徐学义. 基于 ANN-VRFT 的机械臂位置控制[J]. 工业控制计算机, 2016, 29(9): 59-61.
- [14] 宁海成. 基于非线性微分方程的机械臂运动位置控制方法[J]. 机械与电子, 2022, 40(11): 46-50.
- [15] 梁艳芳,杨永明,胡云飞,等. 基于改进滑膜控制器的机械臂力/位混合控制研究[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(23): 91-94, 98.
- [16] 田志彬,崔顺风. 双手互换机械臂的运动学建模及控制研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(4): 113-115.
- [17] 高红红,马保吉,杨恒,等. 六自由度上料机械手控制系统的设计与测试[J]. 仪表技术与传感器, 2022(1): 57-61.
- [18] 翟文正. 基于 Simulink Real-Time 的 dVRK 机械臂实时控制研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(15): 53-58.
- [19] 夏长高,杨鹏程,韩江义,等. 基于遗传算法优化的除草机械臂模糊 PID 控制研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(12): 15-21.

收稿日期:2023-11-17